

モバイルマッピングシステムの河川堤防管理 への適用性の検討

APPLICATION OF MOBILE MAPPING SYSTEM TO RIVERINE LEVEE MANAGEMENT

東良慶¹・吉岡裕嗣²・西山哲³・石川貴一郎⁴・船田征⁵・久保田啓二郎⁶
Ryoukei AZUMA, Yuji YOSHIOKA, Satoshi NISHIYAMA, Kiichiro ISHIKAWA,
Mitsugu FUNADA and Keiji KUBOTA

¹正会員 博(工) 京都大学 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

²正会員 株式会社パスコ 関西事業部 (〒556-0017 大阪市浪速区湊町1-2-3)

³正会員 博(工) 京都大学 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

⁴非会員 博(工) 早稲田大学 理工学術院 (〒162-0044 東京都新宿区喜久井町17)

⁵正会員 株式会社パスコ 関西事業部 (〒556-0017 大阪市浪速区湊町1-2-3)

⁶非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

This paper describes the applicability assessment of the Mobile Mapping System (MMS) to the high-accuracy monitoring technique of riverine levee. This system composed of a car, a 2D laser scanner, a GPS/IMU system and digital cameras. The data of a laser scanner is recorded synchronously with position, attitude information by GPS/IMU, and through the postprocessing of these data, 3D high-accuracy topographical measurement is performed. The measurement accuracy of MMS was assessed through the field test on the running velocity, pavement condition, direction of laser radiation and so on. As a result, in the case of radiation distance was less than 30m, measurement with accuracy of $\pm 20\text{mm}$ was possible. If position and elevation information were compensated based on multiple data set, long-distance high-accuracy measurement which exceeds 100m was possible. It was concluded that the MMS is the most appropriate method in terms of the efficient and effective levee management.

Key Words : Mobile Mapping System, riverine levee management, 2D laser scanner

1. はじめに

我が国の河川堤防は、各河川における整備計画や基本方針に基づき、順次整備が行われてきている。しかし、流域の低平地における都市化の進展、そして、地球温暖化の影響による気象イベントの極値の増大とあいまって、洪水災害が頻発する傾向にある。このような環境下において、治水安全度を維持あるいは向上させるための構造物等によるハード対策には、相当な経済的コストを要する。しかし、近年の財政状況下においては難しい。このことから、現行の河川堤防の維持・管理手法の効率化・高度化が期待されている。

一方、測量分野においては、航空写真測量や航空レーザ測量の精度が向上したことにより、広範囲の3次元地形測量が可能となっている¹⁾。しかし、機材の運用、維

持管理にコストを要し、頻繁な計測も困難である。地上測量分野において、3次元レーザスキャナの登場により高精度で高密度な地形測量が可能となった。しかし、広範囲の測量には、機材の再設置が必要であり、機動性、時間的効率の観点から適していない。そこで、2次元レーザスキャナを車両に搭載し、広域な計測領域を迅速かつ効率的に測量するモバイルマッピングシステム(MMS; Mobile Mapping System)が開発され、近年普及しつつある^{2), 3), 4)}。

本研究では、車両搭載型レーザスキャナを利用したMMSを用いて、相模川下流部において現地計測を実施した。各計測では走行速度、走行路の状況(アスファルト舗装、砂利道)、微地形変状の同定可能距離、レーザスキャナの取付方法などに着目し、これらの計測精度への影響について評価する。これにより、効率化、高度化が求められている河川堤防のモニタリング技術としての

MMSの適用性について検討を行う。

2. モービルマッピングシステム (MMS)

本研究では、河川堤防のモニタリング技術への適用性を検討するレーザスキャナとして、遠距離・高密度レーザ (VQ-250 (Riegl社)) を選定した (表-1)。また、レーザ機器の特性を比較、検討するために近距離・低密度レーザ (LMS291 (Sick社)) による計測 (垂直照射型のみ) も併せて実施した。VQ-250はLMS291と比較して、取得点数、最大到達距離などについて優れており、作業

表-1 使用したレーザスキャナ機種の比較

機種	VQ-250(Riegl社) 遠距離・高密度	LMS291(Sick社) 近距離・低密度
取得点数	30万点/秒	1.35万点/秒
スポット径	31mm@100m	25cm@20m
視野角度	360°	180°
最大到達距離	500m	30m
重量	11kg	4.5kg
反射輝度の取得	可	可(制限あり)
スキャン速度	100回転/秒	75回転/秒



図-1 計測に使用したMMS車両 (垂直照射型)

■ : VQ-250 (遠距離レーザ) ○ : GPS アンテナ
 ■ : LMS291 (近距離レーザ) □ : 慣性計測装置 (IMU)
 ■ : デジタルカメラ

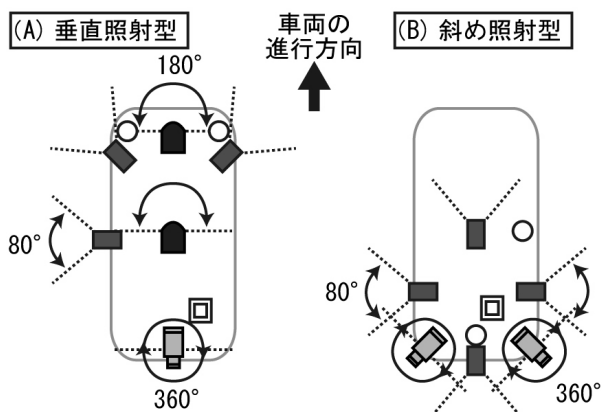


図-2 車両天板上での各種装置 (センサ) の設置位置

の効率性を考慮し、適用性を評価・検討する計測装置として選定した。

移動体は一般的な車両であり、その天板部にレーザスキャナを搭載するMMSを採用した (図-1)。移動計測の高精度化には、属性センサ (レーザスキャナ) のデータ取得時における、正確な位置、姿勢の情報が必要となる。そのため、航法装置と属性センサの位置関係を一定にする必要がある。本研究のMMSでは各種装置を車両の天板上に配置し (図-2)、剛性を保つことで、データ計測時の属性センサの位置、姿勢を計測した。

車両位置・姿勢の測定にはGPSおよび慣性航法装置 (IMU) の複合装置を使用した。位置、姿勢情報は計測終了後、後処理 (補正) し、GPS受信データの欠測による誤差を軽減した。これにより、高精度な計測が可能となっている。

3. 計測機器、条件の違いによる計測精度の検証

(1) 現地計測エリア

MMSによる現地計測を試行する調査地として、相模川の最下流部を選定した (図-3(A))。特に、右岸2.4km地点付近 (図-3(B)) において、機種および計測条件による計測精度への影響を検討するための計測を実施した。当該エリアの堤外地は150m幅の高水敷が広がっており、河川敷公園として整備されている。そのため、高水敷地表は植生の影響がほとんどなく、測定ターゲット等の設置に都合が良い。また、堤防法尻 (堤外地側) に管理用道路 (未舗装) が整備されており、堤防の地形計測 (モニタリング) の適用性を検討する上で、様々な条件が適合するフィールドである。本計測は2011年11月29、30日および12月7日に実施した。

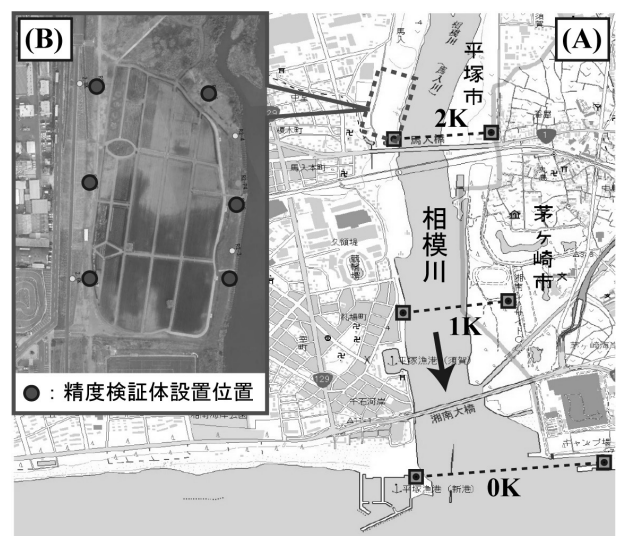


図-3 MMSの精度検証計測を実施した現地計測エリア；(A) 相模川下流域の地形図 (25000分の1)、(B) 右岸2km付近の空中写真

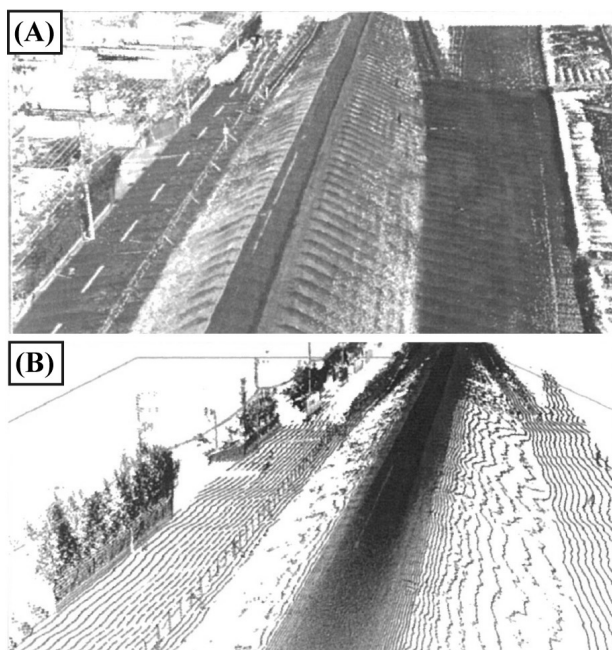


図-4 レーザスキャナの違いによる点群データの比較；(A)遠距離・高密度レーザ（VQ-250），(B)近距離・低密度レーザ（LMS291）

(2) 計測機器（レーザスキャナ）の比較

本研究では車両に搭載する2次元レーザスキャナの機器による計測結果の差異を検討するために、遠距離・高密度レーザ（VQ-250）と近距離・低密度レーザ（LMS291）の比較を行った。図-3(B)に示す調査エリアの堤防天端の舗装路を走行し、それぞれのレーザスキャナによって計測された点群データを図-4に示す。

遠距離・高密度レーザについては、堤内地側の道路が明瞭に計測されていることがわかる（図-4(A)）。一方、近距離・低密度レーザについては、堤防の天端近傍付近のみが密に計測されており、法面から堤内地、堤外地では、点群に空白が生じていることがわかる（図-4(B)）。この結果、車両搭載型MMSでは遠距離・高密度レーザによって、堤防全体の形状を高解像度（1～3cm間隔）で計測できることがわかった。堤防天端を車両走行することにより、効率的な堤防のモニタリングが可能である。

(3) 車両走行速度の比較

車両の走行速度による計測精度を検証するため、図-3(B)に示す堤防区間において、天端部の舗装路に検証点を設けた。これらの点のトータルステーション（TS）測量結果を真値として、MMS計測結果と比較し、走行速度による計測誤差を算定した。具体的には、42箇所の検証点を設置し、それらの位置・高さを予めTSにより測量した。その後、車両走行速度が10、20および30km/で一定の計測をそれぞれ実施した。MMS計測では任意の点を繰り返し測定することは極めて困難であるため、検証点の半径50mm以内で計測されたMMSデータを抽出し、平均値

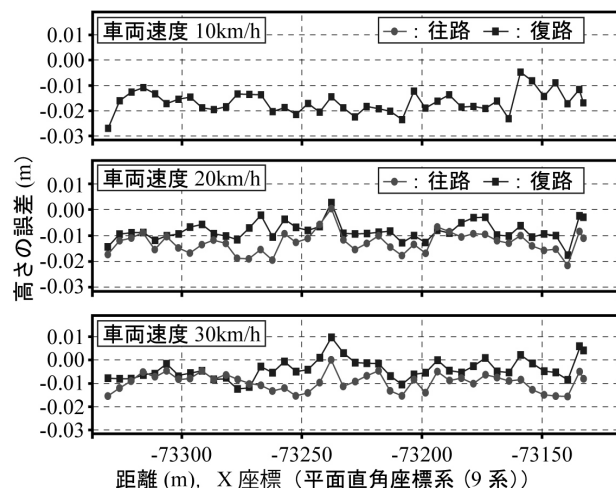


図-5 堤防天端に設置した検証点の計測誤差（TS測量による標高値との比較）

表-2 車両走行速度の違いによる測定誤差の比較

車両速度 (km/h)	10		20		30	
路程	復路	往路	復路	往路	復路	
平均高さ 誤差(mm)	-16.70	-12.66	-8.10	-9.45	-3.76	
標準偏差 (mm)	4.31	4.11	3.66	3.71	4.55	

と標準偏差を算定した。

MMSデータの平均値からTS測量による標高値を減算し、各車両の走行速度における高さ誤差の縦断方向の変化を図-5に示す。各走行速度における平均高さ誤差および標準偏差を表-2にまとめて示す。その結果、すべてのケースにおいて、TS測量結果との誤差は20mm以下であり、標準偏差は5mm以下であった。堤防天端については非常に高精度で計測できていることがわかる。また、往復の計測結果を比較すると、MMS計測は良好な再現性を有していることがわかる。車両の走行速度が速くなると、誤差、

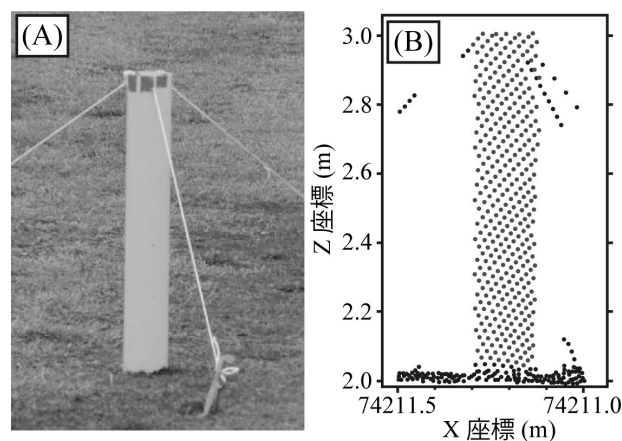


図-6 計測精度の検証に用いた円柱のターゲット；(A)実物の写真(高さ1m、半径16.6cm)，(B)計測された点群データ

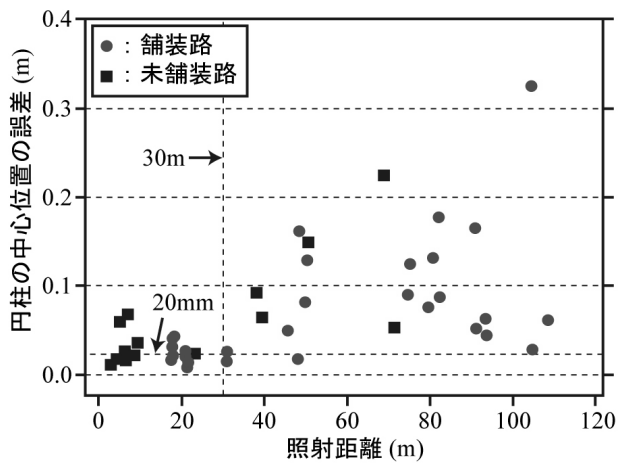


図-7 走行路の条件の計測精度への影響

標準偏差が小さくなる傾向が見られるが、これは車両速度が速くなることにより、路面の凹凸の影響が軽減されたためと考えられる。しかし、本計測では舗装路を走行したため、このような結果になったが、路面状況（例えば、未舗装道路）によっては上記の傾向（車両速度に計測精度が依存しない）は生じないと推察される。

(4) 走行路条件の比較

走行路の状況の計測精度への影響を検討するために、舗装路（アスファルト舗装）を走行したケースと未舗装路（砂利道）を走行したケースを比較する。計測精度を検証するために、高水敷上の6カ所（図-3(B)）に円柱のターゲット（図-6(A)）を設置した。この円柱ターゲットを計測した点群データを拡大し、図-6(B)に示す。計測されたデータから円柱の中心点を算定し、この値とTSによる測量結果との差を誤差として評価した。

アスファルト舗装路および砂利道を走行したケースそれぞれについて、ターゲットまでの照射距離と誤差の関係を図-7に示す。両ケースともレーザの照射距離が30mよりも遠距離の場合、照射距離に比例して計測誤差が増加していることがわかる。よって、カタログスペックで計測可能距離が100m以上の機器であっても、誤差が±20mm以下の計測精度を確保できる計測範囲は30m程度と考えられる。一方で、走行路が未舗装の場合、照射距離が30m以下であっても、誤差が±20mmを超過しており、舗装路上と比較して、計測精度が若干低下することがわかる。

(5) 微地形変状の同定精度

堤防のモニタリングでは重要事項である地形変状に関する測定精度を検討するため、微地形変状のモデルとして図-8(A)に示すステップ型ターゲットを作成した。ステップは6段、それらの段差は15mmとした。これらのモデルを堤防天端の川表側法肩から①3.9m、②16.4m、③28.5m、④55.5mの距離の平坦面に設置した（図-8(B)）。

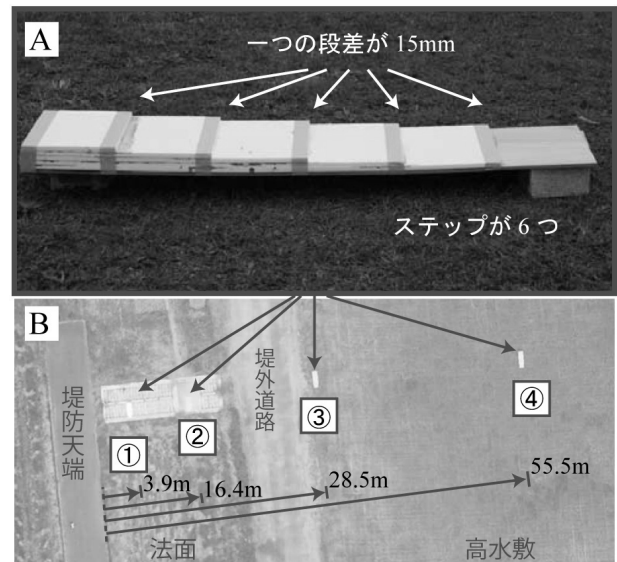


図-8 微地形変状同定用のステップ型ターゲット(A)とそれらの現地での配置図(B)

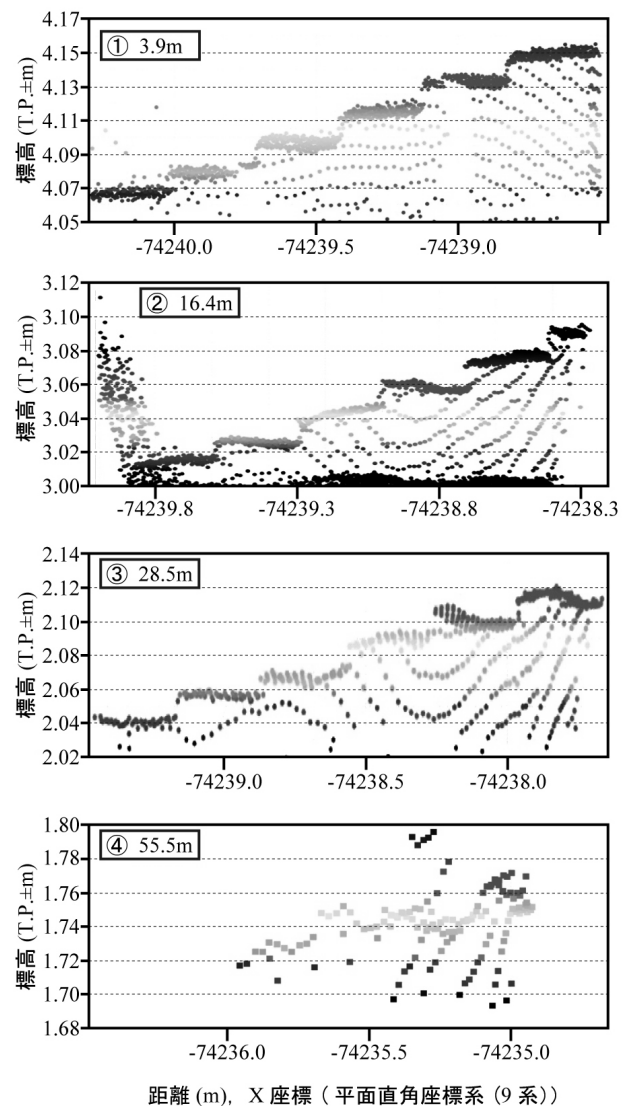


図-9 ステップ型ターゲットの点群データの横断面図（平面直角座標系のX軸方向（南北方向）断面）

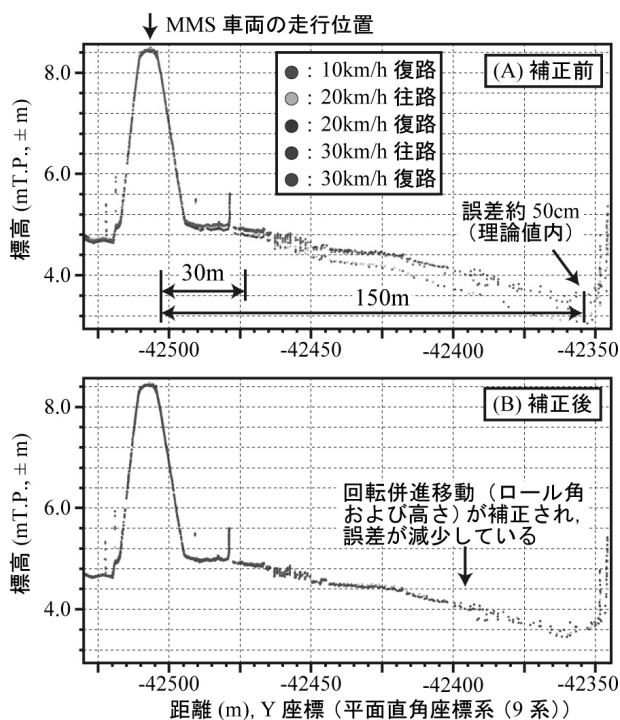


図-10 走行路の条件の計測精度への影響

車両は堤防天端舗装道路を通行し、MMS計測を実施した。

ステップ型ターゲットを計測した点群データの平面直角座標のX軸（南北方向）に沿った横断面図を図-9に示す。照射距離が①3.9m, ②16.4m, ③28.5mの計測結果では6段のステップが明瞭に計測できた。一方、照射距離が④55.5mの計測結果では、右肩上がりの傾斜が把握できるものの、15mmの段差を同定することはできない。これらの結果、レーザ照射範囲が30m以内であれば、15mmの段差（微地形変状）の同定が可能であることがわかった。この計測精度は上述の円柱ターゲット計測による計測精度（照射距離30m、計測精度±20mm）と一致する。しかしながら、本計測は舗装路走行での計測結果であり、今後、未舗装路での計測の同定精度についての検証が必要である。

4. 誤差の補正と計測データの高精度化

本研究で採用した遠距離・高密度レーザスキャナはカタログ上の性能では75m～100mの距離でも計測が可能である。しかし、3.4節での精度検証の結果、照射距離が30m以上の場合、±20mmの計測精度は保証できないことがわかった。本章では遠距離の計測データに生じる誤差の補正を試み、計測データの精度向上を行う。

堤防に対して直交方向の点群データ断面図を図-10(A)に示す。堤防から近距離（30m以内）では、点群データの高さ方向のばらつきは小さい（計測精度が良い）ことがわかる。一方、堤防から150m程度離れた地点において

は、計測ケース間でのばらつきが大きくなっており、最大で約50cmの誤差が生じている。GPSの位置標定性能（高さ方向で約6cm）およびレーザスキャナの精度（±5mm）を考慮すると、各走行における計測点のばらつきが約1cm、高さ方向の誤差が2～3cmである。これらの誤差にもとづき、理論上の誤差を求めると照射距離が150mで誤差が約50cmとなり⁵⁾、本計測は理論的な計測精度と整合した結果が得られていることがわかる。

上述のような照射距離にともなう計測誤差の増大の原因としては、走行時の回転併進移動（ロール角および高さ）による誤差がデータ解析に影響していると考えられる。本研究では、複数回の計測データを再処理（重ね合わせ処理）することにより誤差補正を実施した。具体的には、複数ケースの計測データを比較することにより、各走行時のロール角および高度を再解析し、計測時の姿勢情報を補正する。この再処理（重ね合わせ補正）の結果、100mを超える照射地点でも精度良く計測できていることがわかる（図-10(B)）。このように、計測データの誤差補正により、堤防地形の経年変化の3次元モニタリングを高精度に行えることがわかる。

5. 計測システムの違いによる計測精度の検証

本章ではレーザスキャナの照射方向が異なる2つのシステム（図-2）を採用し、それらの計測精度の検討を行った。図-11に示す照射ターゲットをMMS車両の走行軌道からそれぞれ30, 50, 80, 100m地点に設置し、それらを垂直計測、斜め計測のそれぞれのシステムで計測した。計測時の車両走行速度は10km/hに設定した。照射ターゲットの2つの面の交線をMMS計測の点群データから生成し、実測値（GPSによる測量結果）と比較した。

実測値とMMS計測値との誤差を位置精度とし、レーザ照射距離との関係を図-12に示す。斜め計測の場合、レーザの照射方向が進行方向に対し45°方向であり、

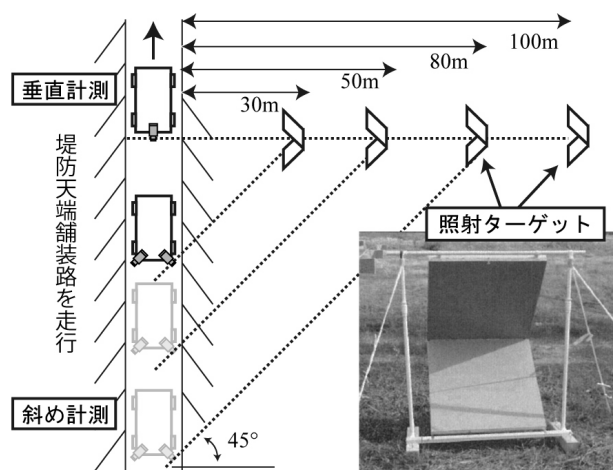


図-11 レーザ照射方向の違いによる計測精度の検証実験

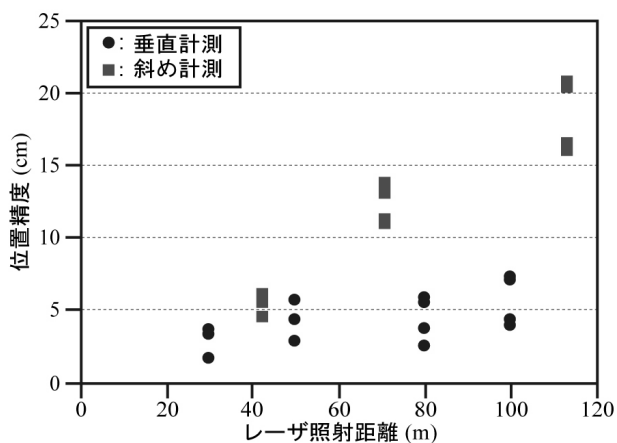


図-12 レーザ照射方向（距離）と計測精度の関係

ターゲットまでの照射距離は垂直計測の約1.4倍となる（図-11）。垂直、斜め計測の両ケースにおいて、照射距離が100mで誤差20cm以内の計測精度となっており、MMSの理論精度を上回る計測が実施できていることがわかる。堤防地形を対象とした計測範囲（天端から30m程度）では、計測システムによる精度の違いはない。

垂直計測の利点としては、高精度計測が可能な30mのレーザ照射距離で、最大の範囲を計測することができるため、効率性が良い。一方、斜め計測の利点は、垂直計測ではレーザが遮蔽されて計測が困難な構造物の背面等の計測が期待できる。

6. 結論

河川堤防の維持・管理手法の効率化・高度化を目的として、本研究では車両搭載型レーザスキャナを利用したモバイルマッピングシステム（MMS）による相模川下流部の堤防周辺地形の測量を実施した。レーザスキャナの機種、車両走行速度、走行路状態、レーザの照射方向等の計測条件の違いによる計測精度への影響を評価し、MMSの河川堤防の高精度モニタリングへの適用性を検討した。本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 堤防の天端、法面を含め、堤体の地形を高精度かつ効率的に計測（モニタリング）するためには、遠距離・高密度レーザスキャナの適用が必要であり、近距離・低密度レーザスキャナでは困難である。
- 2) 車両走行速度が30km/h以下の場合には、走行速度の違いによる計測精度の変化はなかった。堤防天端の検証点について、トータルステーション（TS）測量結果と比較した結果、誤差は±20mm以内であった。
- 3) アスファルト舗装路および未舗装路（砂利道）を走行した計測のデータを比較した結果、レーザ照射距離が30m以内であれば、計測精度が±20mmの高精度計測が可能であった。未舗装路の場合、照射距離が30m以下であっても、誤差が±20mmを超過しており、計

測精度が若干低下することがわかった。

- 4) 微地形変状のモデルとしてステップ型ターゲットの計測を実施した。その結果、レーザ照射距離が30m以内であれば、15mmの段差の同定が可能であり、照射距離がおよそ20m以内であれば、段差（地形変化）を定量的に計測できた。
- 5) 複数回の計測データを再解析し、計測時の回転併進移動（ロール角および高さ）による誤差を補正することにより、長距離（100mを超える）のレーザ照射でも高精度な計測が可能であった。
- 6) 車両の進行方向と直交方向にレーザを照射するシステム（垂直計測）と斜め45°方向に照射するシステム（斜め計測）では、計測精度はほぼ同程度であった。垂直計測の場合、測定範囲が最大であり（計測点まで最短で照射するため）、効率性に優れている。斜め計測の場合、構造物の背面等の垂直計測では計測できない領域の計測が期待できる。
- 7) 総体的には、MMSの計測精度（照射距離30m以内、精度±20mm）は極めて優れており、河川堤防管理に適した技術であり、効率的で高度な堤防モニタリングが可能である。

謝辞：本研究は平成23、24年度河川砂防技術研究開発制度（河川技術分野）の助成を受けたものです。また、現地調査を実施するにあたり、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所関係各位の多大なるご配慮を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 国土技術研究センター：「平成19年（2007年）新潟県中越沖地震」による河川堤防の被災調査結果（第2報），<http://www.jice.or.jp/bosai/pdf/070914houkoku2.pdf>，（参照2013年3月20日）。
- 2) 石川貴一郎，天野嘉春，橋詰匠，瀧口純一，清水聡：モバイルマッピングシステムによる都市空間モデリング，計測自動制御学会産業論文，第8巻，第17号，pp.133-139，2009。
- 3) D. Manandhar, R. Shibasaki: Vehicle-borne laser mapping system(VLMS) for 3-DGIS, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, IEEE 2001 International*, pp.2073-2075, 2001.
- 4) 辻求，入澤元，下垣豊，今野達夫，柴崎亮介，趨卉菁，東明佐久良，山崎由喜，吉原章博，羽山和紀：車両搭載型センサを用いた3次元都市空間モデルの自動構築，GIS-理論と応用-vol.13, No.1, pp.91-98, 2005。
- 5) 石川貴一郎：屋外環境下におけるGPSを用いた移動式3次元計測システムに関する研究，博士学位論文，早稲田大学，2010。

(2013. 4. 4受付)